

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Komplexní aplikace pro návrh a analýzu filtrů se spojitým
časem

Complex application for the design and analysis of
continuous-time filters

2013

Michal Wertheim

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Wertheim**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2601R004 Měřicí a řídicí technika
Téma: **Komplexní aplikace pro návrh a analýzu filtrů se spojitým časem**
Complex Applications for Design and Analysis of Continuous-Time Filters

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s analogovými filtry.
2. Seznámení se s multifunkční měřicí kartou MF624.
3. Vytvoření grafického uživatelského prostředí pro proměňování filtrů.
4. Změření frekvenčních charakteristik a jejich porovnání s teoretickými průběhy.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] DOSTÁL, Tomáš a Vladimír AXMAN. *Elektrické filtry*. skriptum FEKT VUT Brno, 2007. 135 s.
[2] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. 215 s. ISBN 80-730-0133-0.
[3] SLABÝ, Roman. *Výuková aplikace pro zpracování signálů a soustav*. Ostrava, 2009. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra měřicí a řídicí techniky.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Pieš, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 7. května 2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "M. Škvařil", is written above a horizontal line.

podpis autora

Poděkování

Chci touto formou vyjádřit vřelé díky vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Piešovi, Ph.D., za jeho přístup, připomínky a odborné rady, které mi v průběhu této práce byly poskytovány.

Abstrakt:

Obsahem práce je vytvoření grafického uživatelského prostředí pro návrh a proměřování analogových filtrů. V souvislosti s touto tematikou byly navrženy a sestaveny dvě reálné soustavy, které mohou být s grafickým uživatelským prostředím propojeny prostřednictvím měřicí karty. Byla zajištěna možnost porovnání matematického a fyzického modelu analogového filtru.

Klíčová slova:

Analogové filtry, analýza a měření, frekvenční charakteristiky, Matlab, grafické uživatelské rozhraní, MF 624

Abstract:

The work is intended to create a graphical user interface for the design and measurement of analog filters. In connection with this topic have been designed and built two real system that can be linked with a graphical user interface by measuring card. Comparison of mathematical and physical model of the analog filter has been ensured.

Key word:

Analog filters, analysis and measurement, frequency characteristics, Matlab graphical user interface, MF 624

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Teorie analogových filtrů.....	2
2.1.	Kmitočtové filtry.....	2
2.2.	Použití filtrů.....	2
2.3.	Realizace analogových kmitočtových filtrů.....	3
2.4.	Rozdělení analogových filtrů z hlediska použití stavebních prvků.....	3
2.5.	Základní typy aproximace.....	4
2.5.1.	Butterworthův filtr.....	4
2.1.1.	Čebyševův filtr.....	5
2.1.2.	Besselův filtr.....	5
2.6.	Frekvenční charakteristiky.....	6
2.7.	Návrh a výroba ARC filtrů dolní a horní propustí aproximace Butterworth a Čebyšev.....	8
2.7.1.	Výsledné schéma zapojení kombinované dolní propusti.....	9
2.7.2.	Výsledné schéma zapojení kombinované horní propusti.....	10
3.	Multifunkční měřicí karta MF 624.....	12
3.1.	Výčet základních parametrů karty MF624.....	12
3.2.	Použití karty MF624.....	13
3.3.	Konfigurace měřicí karty v prostředí Simulink.....	14
4.	Prostředí Matlab.....	16
4.1.	Matlab jako komplexní výpočetní nástroj.....	16
4.2.	Simulační prostředí Simulink.....	16
4.3.	Grafické uživatelské rozhraní v Matlabu.....	17
4.4.	Prostředí GUIDE.....	18
5.	Komplexní aplikace pro návrh a analýzu filtrů spojitých v čase.....	20
5.1.	GUI pro analýzu matematického modelu filtru.....	21
5.1.1.	Popis řešení.....	22
5.2.	GUI k proměrování reálných filtrů.....	23
5.3.	Měřicí řetězec.....	25
5.4.	Proměrování soustav.....	26

5.5. Algoritmus měření	27
6. Zhodnocení dosažených výsledků.....	29
Závěr	34
Citovaná literatura	
Seznam příloh	

1. Úvod

Práce se zabývá tvorbou aplikace pro analýzu a proměřování analogových kmitočtových filtrů. Tyto obvody mohou být realizovány jednoduchým zapojením, přesto je jim přisuzován velký význam v širokém spektru uplatnění. Nejčastěji kmitočtové filtry využijeme k odstranění nepotřebného kmitočtového spektra. Vlastnosti kmitočtových filtrů tedy vyšetřujeme na frekvenční doméně. Ideální filtr představuje nulový útlum v pracovní oblasti, a naopak nekonečný útlum v pásmu útlumu. Vstupní signál by tedy měl po průchodu filtrem skokově změnit hodnotu ze své původní na nulovou. Cílem práce je vytvořit uživatelsky přívětivou aplikaci s možností variabilní analýzy analogových filtrů s následnou možností porovnání s výsledky měření na fyzickém modelu. Uživatel bude mít možnost okamžitého výpočtu a vykreslení běžných aproximací s dílčími parametry, a tak může bleskově stanovit vhodnost filtru pro svou aplikaci. K tomuto účelu bude zpřístupněna volba základní aproximace filtru, řádu filtru, typu propusti a mezního kmitočtu. Další významnou funkcí je možnost změřit a případně ověřit libovolnou soustavu v přípustném frekvenčním pásmu. Pro měření je možnost použití generování sinusového signálu s volbou amplitudy, offsetu a frekvenčního pásma. Práce se dále zabývá obecným přiblížením analogových filtrů, rozбором kompatibilní měřicí karty MF 624 a samotnou realizací komplexní aplikace.

2. Teorie analogových filtrů

2.1. Kmitočtové filtry

Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody, používané v mnoha oblastech elektroniky a elektrotechniky. Jejich hlavním úkolem je selekce kmitočtových složek signálu, který nimi procházejícího dle jejich frekvence. Filtry obvykle propouštějí některé kmitočtové složky bez útlumu (tuto frekvenční oblast můžeme nazvat jako propustné pásmo) a jiné kmitočtové složky potlačuje (pásmu potlačení, útlumu, nebo nepropustné pásmo). Tyto vlastnosti většinou vyjadřujeme amplitudovou (modulovou) kmitočtovou charakteristikou, což je závislost modulu napěťového přenosu na kmitočtu. [1]

Prochází-li filtrem signál, dojde obvykle k časovému zpoždění tohoto signálu na výstupu, což je důsledkem fázových posuvů (zpoždění) procházejících harmonických kmitočtových složek signálu. Tyto účinky obvykle vyjadřujeme fázovou kmitočtovou charakteristikou. Jejich vliv na výstupní signál je také patrný při znázornění signálu a vlastností filtru v časové oblasti (například odezva na jednotkový skok, případně odezva na jednotkový impuls). Fázové účinky filtru na signál v kmitočtovém pásmu propustí se v časové oblasti mohou projevit kupříkladu jako nežádoucí překmity případně zvlnění průběhu tohoto signálu. Tyto vlivy je však možno minimalizovat vhodnou volbou filtru. Existují ale i situace, kdy toto na první pohled špatné chování filtrů záměrně využíváme, kupříkladu ve zpožďovacích, nebo fázovacích obvodech. [1]

2.2. Použití filtrů

Ve zpracování signálů patří kmitočtové filtry mezi základní stavební bloky. V radiotechnice je časté použití pásmových propustí pro výběr přijímaných signálů (vstupní obvody přijímačů, mezifrekvenční filtry), dolních propustí a horních propustí jako výhybek pro rozdělení kmitočtových pásem v anténních obvodech a předzesilovačích, pásmových zádrží pro potlačení (rejekci) rušících signálů, dolní propustí pro různé typy demodulátorů atd. Další využití filtrů můžeme pro přenos dat v telekomunikacích.

V elektroakustice se často používají filtry korekční (korekce hloubek, výšek, pásmové korektory, korektory kmitočtových charakteristik dynamických přenosů, magnetofonových hlav), různé typy filtrů v systémech k omezení šumu (Dolby aj.) Dolní, horní a pásmové propustí tvoří kmitočtové výhybky v reproduktorových soustavách (pasivní či aktivní).

Další oblastí využití kmitočtových filtrů je měřicí technika, kde se jedná o filtry pro výběr měřeného kmitočtového pásma, zejména v různých typech selektivních měření (selektivní voltmetry, měřiče harmonického a dalšího typu zkreslení, různá vysokofrekvenční měření). Několik typů váhových filtrů se využívá pro akustická měření pro měření úrovně akustického signálu (modelace vnímání lidského ucha). I přes rozvoj číslicových kmitočtových filtrů. Pro podstatné. U slabých a hodně zarušených signálů je i přes rozvoj číslicových kmitočtových

filtrů výhodné před převodem spojitého signálu na diskretní provést **analogovou předfiltraci** pro podstatné zvýšení dynamického rozsahu systému.

V systémech pro převod analogového signálu na číslicový tvoří filtry dolní propust zvláštní skupinu aplikací. V mnoha případech je tedy potřebné použít „antialiasingový“ filtr pro splnění Shannonova teorému, jež zamezí překládání rušivého spektra do užitečného signálu. Na výstupu takového systému se použije obdobný rekonstrukční filtr. V regulační technice se kmitočtové filtry používají také často. V silnoproudé technice pak nacházejí uplatnění speciální odrušovací filtry. Vzhledem k širokému využití kmitočtových filtrů v elektronice i elektrotechnice je znalost a orientace v této problematice nutná pro tvůrčí pracovníky v elektrotechnice. [1]

2.3. Realizace analogových kmitočtových filtrů

V praxi lze kmitočtové filtry realizovat spousty různými způsoby, které ale do jisté míry určují i některé podstatné provozní vlastnosti filtru. Pro daný účel je tedy vhodné si vybrat nejvhodnější způsob realizace. Způsoby realizace analogových filtrů můžeme orientačně rozdělit do dvou skupin:

- a) Sestava z diskretních prvků odpory, kondenzátory, cívky, operační zesilovače aj.), kdy si uživatel může sestavit filtr dle svých požadavků relativně bez problémů.
- b) Provedení v podobě integrovaného bloku bývá obvykle menší, levnější a lépe propracované, neboť jej výrobce vyrábí sériově optimální technologií. Nevýhodou této realizace je ale fakt, že si uživatel již tento filtr nemůže upravit dle svých specifických speciálních požadavků a musí přesně dodržet výrobcovi podmínky zapojení.

Realizace filtru záleží na podmínkách úlohy. Obecně jsou analogové filtry vhodné v případech vysokého kmitočtu signálu, slabého a zarušeného signálu, příp. jedná-li se o výkonovou aplikaci. Nemusíme při tom řešit dostatečnou výpočetní kapacitu jako je to u řešení s číslicovými filtry. [1]

2.4. Rozdělení analogových filtrů z hlediska použití stavebních prvků

RC filtry se řadí mezi jednoduché, dostupné a jak již název napovídá, jejich základní součástky rezistory a kondenzátory lze pořídit za nízkou cenu. Těmto aspektům ale odpovídá i jejich využití v praxi, kde se realizují jako filtry prvního či druhého řádu s nízkým činitelem jakosti. Filtry třetího a vyššího řádu se takto v praxi skoro neuplatní.

RLC filtry teoreticky umožní sestavit libovolný typ filtru. Použití cívky ale představuje některá omezení, poněvadž pro nízké kmitočty kdy indukčnost L nabývá velkých hodnoty, jsou cívky rozměrné, tedy i ztrátové a drahé. Jejich použití v praxi je limitováno vlastními ztrátami cívek a také kondenzátorů a pro propusti a zádrže s velmi malou relativní šířkou pásma jsou omezena

tolerancí a stabilitou jejich hodnot. Obvykle jsou tedy používány v rozsahu 100 kHz do 300 MHz.

Mikrovlnné filtry jsou postaveny na principu filtru RLC, avšak pro použití v oblasti mnohem vyšší než výše zmíněných 300 MHz. To je umožněno použitím prvků s rozloženými parametry (např. koaxiální vedení).

ARC Filtry také můžeme nazvat jako aktivní RC filtry, ze kterých přímo vychází a principiálně nahrazují filtry RLC. Realizaci ARC filtrů se ale neúčastní cívka, nýbrž přibývají nejčastěji operační zesilovače jakožto aktivní prvek. Vzhledem k tomuto faktu se jejich obvyklý kmitočtový rozsah použití posunul do nižšího pásma většinou v rozmezí 0,1 Hz – 100kHz, vývoj aktivních prvků však toto pásmo rozšiřuje směrem do vyšších hodnot kmitočtů. Nevýhodou použití aktivních prvků je jejich potřeba napájení, které v některých případech musí být navíc symetrické.

ASC Filtry označované také jako filtry se spínanými kondenzátory, vycházejí z předešlého typu filtrů ARC, neboť obsahují přepínané kondenzátory namísto rezistorů. Svou architekturou jsou snadněji integrovatelné, než aktivní filtry RC. Zlomové frekvence lze snadno měnit spínacím kmitočtem. Ve srovnání s klasickými aktivními filtry je ale jejich použitelné frekvenční pásmo ještě užší a vyznačují se vyšším driftem.

Elektromechanické filtry jsou založeny na převodu elektrického signálu na signál mechanický, následném využití formy mechanické rezonance a zpětného převodu na signál elektrický. Chování je obdobné jako pásmová propust. Z hlediska použitého rezonátoru je můžeme dělit na různé skupiny. Používány byly magnetostrikční filtry, ale v současnosti převládají filtry piezokeramické. Úzkopásmové mezifrekvenční filtry s vysokým rezonančním kmitočtem lze realizovat zapojením většího počtu krystalů s precizním výběrem.

Filtry s PAV jsou filtry s povrchovou akustickou vlnou. Jedná se o nový typ integrovaných filtrů založených na principu vyzařování, šíření a fázového skládání povrchových akustických vln v závislosti na kmitočtu. Soustava vysílačích a přijímacích piezoelektrických zářičů se nanese na nosnou keramickou destičku. Přenosová kmitočtová charakteristika filtru je tvarována polohou a rozměry, podobně jako je tomu s anténami. Jsou určeny k realizaci širokopásmovějších obvodů, než je tomu u předešlého typu elektromechanických filtrů. Uplatní se v televizorech jako obrazové mezifrekvenční filtry a v dalších aplikacích pro vysoké kmitočty. Nevýhodou jejich použití je vyšší průchozí útlum. [1]

2.5. Základní typy aproximace

2.5.1. Butterworthův filtr

Butterworth představil v roce 1930 jeden z prvních systematických analogových filtrů návrhových metod a současně je jedním z nejpoužívanějších, neboť je přijatelným kompromisem požadované linearitu fázové charakteristiky a dosaženým útlumem modulové

kmitočtové charakteristiky již při nízkém řádu filtru. Počet pólů udává sklon změny fáze vůči frekvenci, který je plynulý v propustném pásmě frekvenční fázové charakteristiky. Butterworthůva metoda návrhu filtru představuje jednu z typických metod návrhu jako je aproximace Čebyševova, Caurova (eliptická) a Besselova. Butterworthův filtr lze vzhledem ke svým vlastnostem nazvat jako filtr s maximálně plochou amplitudovou frekvenční charakteristikou v pásmu propusti. [2] [3]

Modulová charakteristika je vyjádřena vztahem:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}}$$

2.1.1. Čebyševův filtr

Byl vyvinut chronologicky dvacet let po vyvinutí filtru Butterworthova. Výhodou této aproximace je, že strmost filtru v okolí mezního kmitočtu, je vyšší než odpovídající řádu aproximace. Neduhem schopnosti filtru, která by mohla snížit potřebný řád filtru je ale zvlnění frekvenční charakteristiky v propustné oblasti Čebyševova filtru typu I, (příp. zvlnění v nepropustné oblasti Čebyševova filtru typu II). Toto zvlnění je tím významnější, čím vyšší je počáteční strmost charakteristiky v nepropustném pásmě. [2] [3]

Vyjádření modulové charakteristiky:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 C_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}$$

kde C_n je Čebyševův polynom a

ε je představuje dovolené zvlnění v propustném pásmu.

2.1.2. Besselův filtr

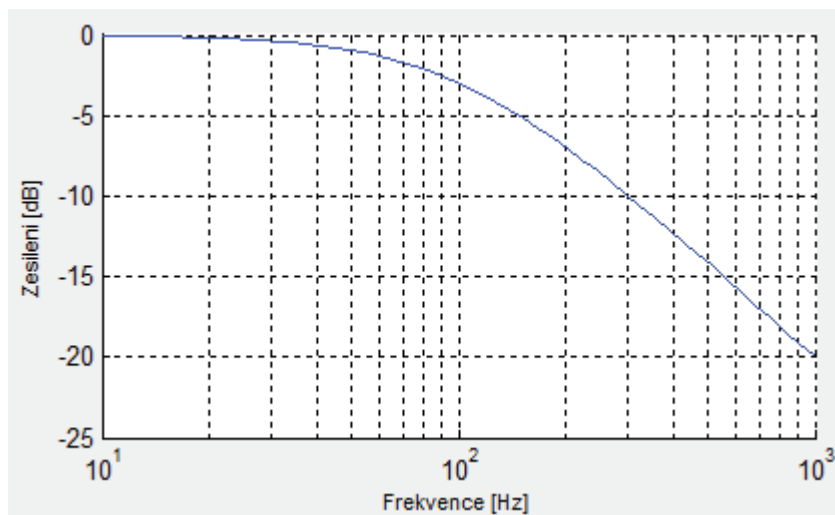
Přesto, že byly předchozí zmíněné typy aproximace definovány z hlediska amplitudové frekvenční charakteristiky, a jsou primárně navrženy ke splnění specifických požadavků na tuto amplitudovou frekvenční charakteristiku, tak toto není případ Besselova filtru. Tento typ filtru je navržen k dosažení maximální frekvenční šířky pásma při zachování konstantního dopravního zpoždění. Stejně jako bylo původně uvedeno, Besselův filtr je síť s konstantním časovým zpožděním. Besselův filtr je založen na Besselových polynomech, avšak pro účely návrhu kmitočtových filtrů tyto polynomy aplikoval W. E. Thomson, a proto se také používá označení Besselův-Thompsonův filtr. Pomineme-li zmíněný původní účel obvodu, může být použit jako dolnoproustný filtr, srovnatelný s ostatními klasickými typy filtrů.

Modul druhého řádu: [2] [3]

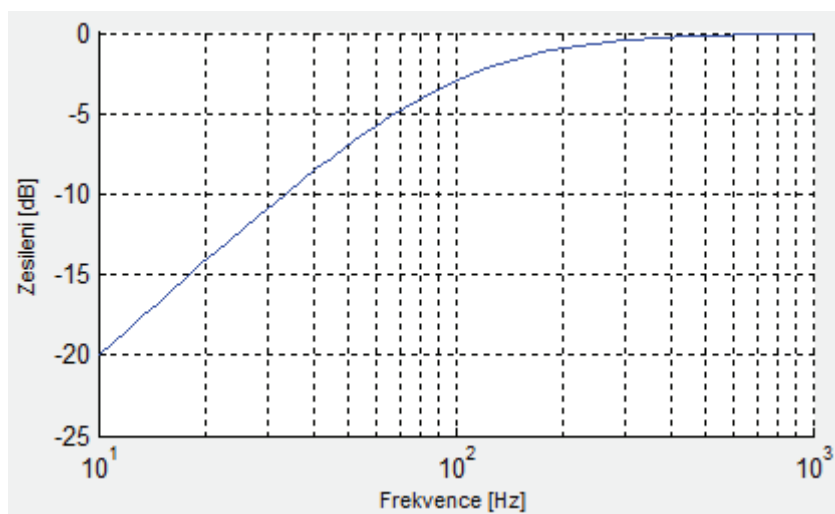
$$|H(j\omega)| = \frac{3}{\sqrt{\omega^4 + 3\omega^2 + 9}}$$

2.6. Frekvenční charakteristiky

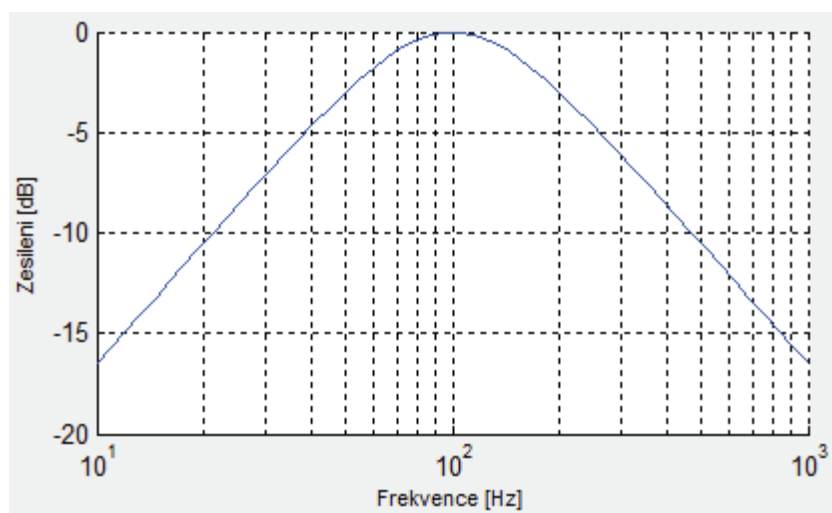
Z hlediska tvaru modulové kmitočtové charakteristiky rozlišujeme tyto čtyři základní typy propustí filtrů. Každá z nich se pak principiálně v praxi uplatní odlišným způsobem.



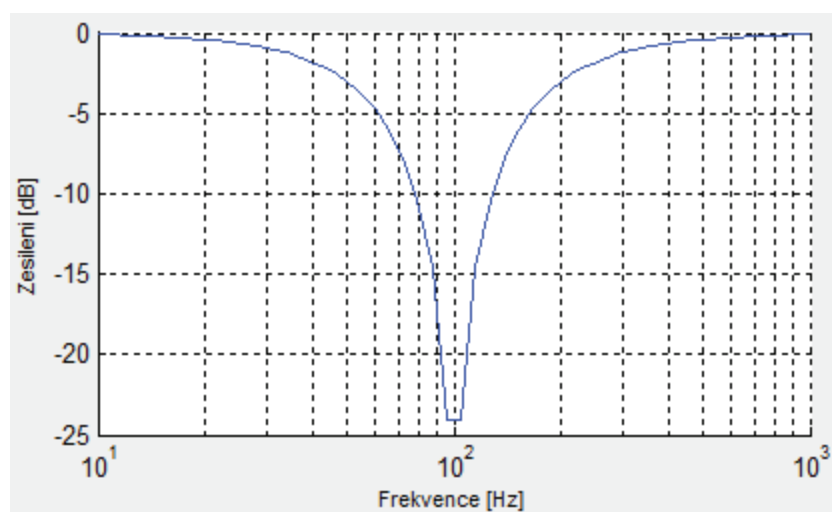
Obrázek 1: Dolní propust prvního řádu s mezním kmitočtem 100 Hz



Obrázek 2: Horní propust prvního řádu mezního kmitočtu 100 Hz



Obrázek 3: Pásmová propust s mezními kmitočty 50 Hz a 200 Hz



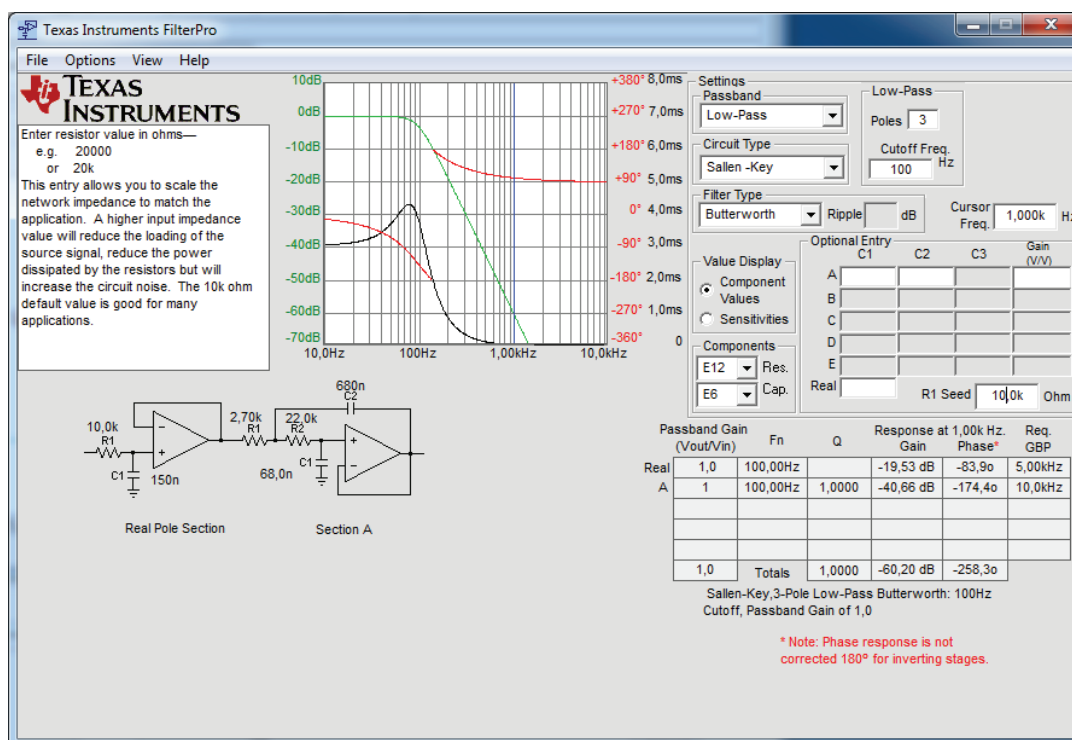
Obrázek 4: Pásmová zádrž s mezními kmitočty 50 Hz a 200 Hz

Charakteristiky, uvedené na obrázku 1-4 byly vykresleny s použitím této aplikace.

2.7. Návrh a výroba ARC filtrů dolní a horní propustí aproximace Butterworth a Čebyšev

Při navrhování testovacích přípravku za účelem komplexního testování měřicího přípravku bylo kladeno za cíl sestavit jednoduchý, přesný filtr s co největší možností variability použití. Jako optimální řešení se nabízela sestava dvou různých propustí aktivních filtrů třetího řádu pro dvě různé aproximace. Vzhledem k rozdílnosti hierarchie pasivních prvků v zapojení pro horní a dolní propust bylo rozhodnuto o sestavení dvou nezávislých desek plošných spojů pro každou z těchto typu propustí zvlášť a formou vhodného dimenzování pasivních prvků pak docílit nejmenšího počtu výhybek, jež zaručí možnost volby odlišné aproximace pracující na stejném mezním kmitočtu. Třetí řád byl zvolen z důvodu možného nezávislého proměřování prvního stupně, čemuž bude také přizpůsobena deska plošných spojů se svorkami za prvním stupněm. Pro možnost změny mezního kmitočtu, kterou lze u prvního řádu nastavovat, bylo rozhodnuto o použití potenciometru.

Z výše zmíněných důvodů se pro účel dimenzování součástek uplatnila utilita společnosti Texas Instruments s názvem FilterPro 2.0.



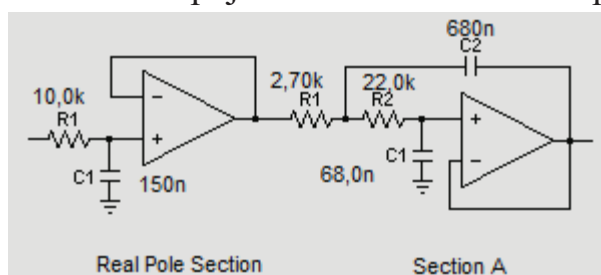
Obrázek 5: Dimenzování prvků v prostředí FilterPro 2.0

V nástroji byla nejprve zvolena aproximace (Butterworth), typ propusti (dolní propust), typ zapojení (Sallen-Key), mezní kmitočet (100 Hz), který bude vzhledem k možnostem použitého přípravku k měření pro všechny filtry stejný. Také byl zadán počet pólů (tři), řady součástek

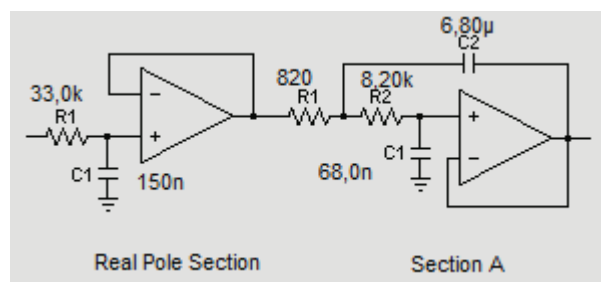
E12 pro odpory a E6 pro kondenzátory, dále bylo možné volit hodnotu vazebního odporu R1 prvního stupně, neboť tomu se přizpůsobí hodnota kapacity C1.

U Čebyševovy aproximace se postupovalo s cílem využití co největšího počtu stejných součástek. Nejprve se provedl výběr stejných základních parametrů jako u předchozí aproximace, následně se stanovilo zvlnění v propustné oblasti 3dB a následně se zvolila stejná hodnota kondenzátoru C1 ve druhé větvi a nakonec se volbou hodnoty odporu R1 docílila shoda kapacity C1. Neshoda veličin ostatních prvků byla řešená mechanickým přepínáním.

2.7.1. Výsledné schéma zapojení kombinované dolní propusti

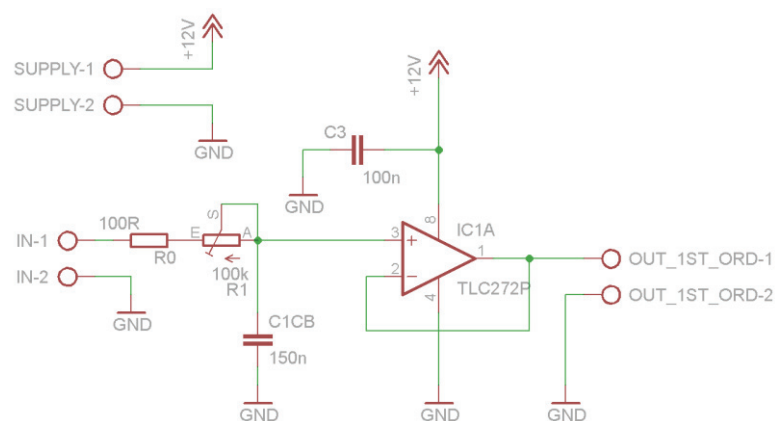


Obrázek 6: Schéma zapojení Butterworthova filtru DP

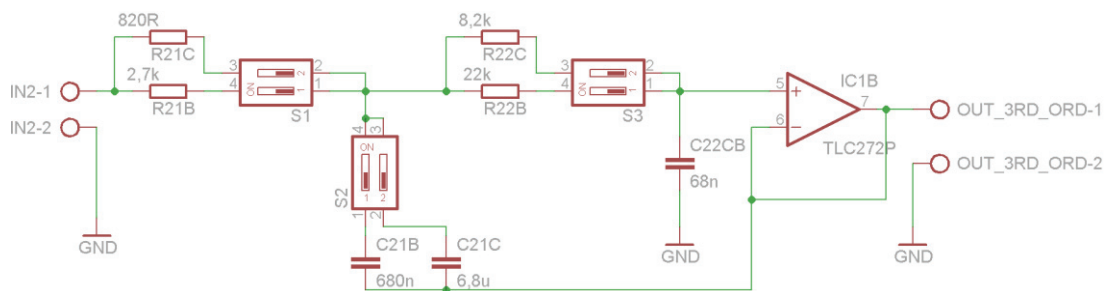


Obrázek 7: Schéma zapojení Čebyševova filtru DP

Pro dolní propust byl vybrán operační zesilovač s nesymetrickým napájením, neboť uspořádání tohoto filtru nebrání průchodu stejnosměrné složky, potřebné k nekonfliktnímu měření. Návrh desky plošných spojů proběhl v nástroji Eagle. Podoba schematických zapojení odpovídá přepínatelné kombinaci obou uvažovaných aproximací. Pro použití Butterworthova filtru bude tedy potřeba sepnout spínače s číslem 1 v každé dvojici přepínačů. A samozřejmě také doladit hodnotu R1 u prvního stupně. Pro Čebyševovu aproximaci pak platí analogický postup s tím rozdílem, že se odepnou spínače číslo 1 a sepnou všechny spínače číslo 2. Samozřejmě také musí dojít k přenastavení hodnoty potenciometru.

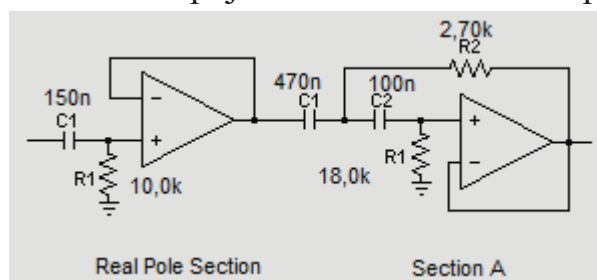


Obrázek 8: Kombinovaná dolní propust 1. část

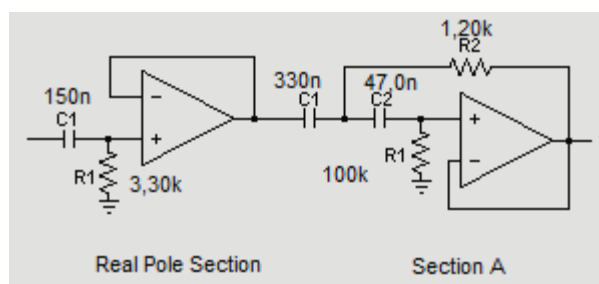


Obrázek 9: Kombinovaná dolní propust 2. část

2.7.2. Výsledné schéma zapojení kombinované horní propusti

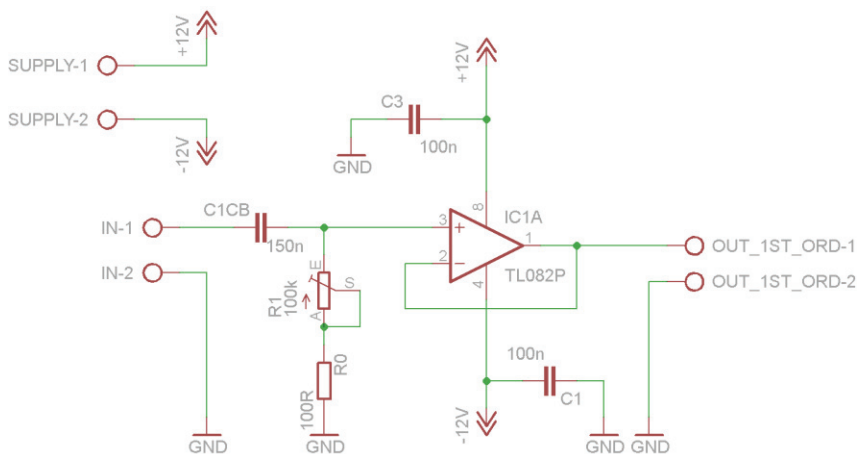


Obrázek 10: Schéma zapojení Butterworthova filtru HP

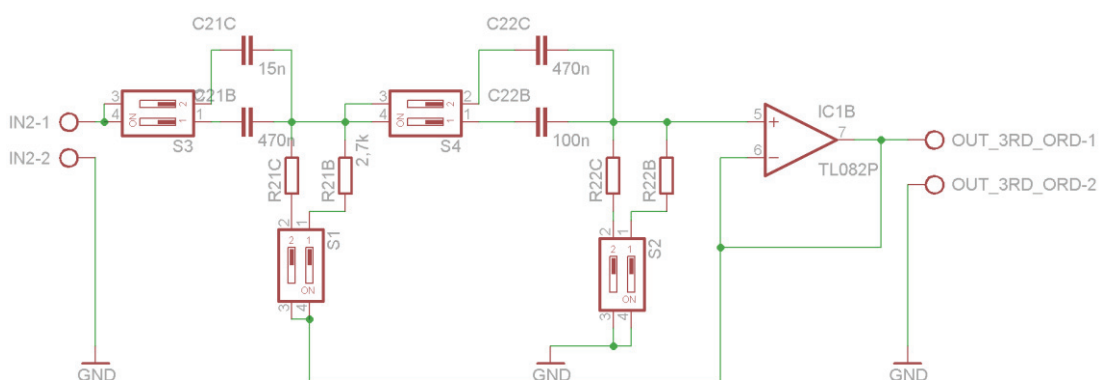


Obrázek 11: Schéma zapojení Čebyševova filtru HP

U horní propusti nebylo možné vzhledem k charakteru vstupního obvodu uvažovat o stejnosměrném offsetu, proto byl filtr horní propusti osazen integrovaným obvodem se symetrickým napájením, které ještě navíc rozšíří měřitelný rozsah měřicí karty. Smysl přepínaná mezi aproximaci zůstává stejný jako v předešlém případě.



Obrázek 12: Kombinovaná horní propust 1. část

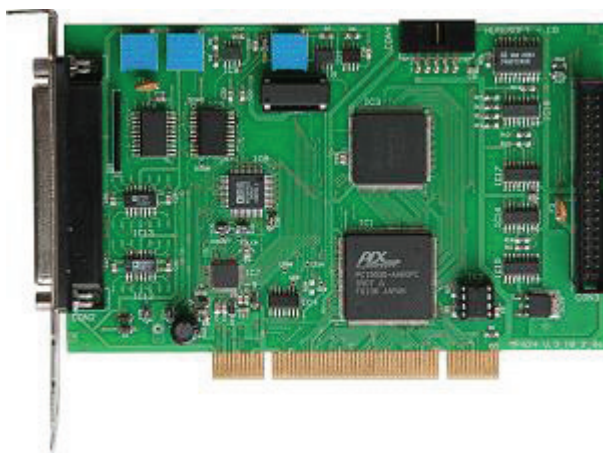


Obrázek 13: Kombinovaná horní propust 2. Část

Předlohy k výrobě těchto soustav jsou uvedeny v příloze.

3. Multifunkční měřicí karta MF 624

MF 624 Multifunkční vstupně-výstupní karta je vyvíjena českou společností Humusoft, pro potřeby propojení osobních počítačů se skutečnými signály. MF 624 obsahuje osm analogových vstupů s rychlými čtrnácti bitovými převodníky se simultánním vzorkováním, osm čtrnácti bitových analogových výstupů, vstupní digitální port s osmi bity a rovněž jeden bajt digitálních výstupů, čtyři kvadrurní modulátory a pět obvodů pro funkci časování, nebo čítání. Karta je tedy navržena pro standardní sběr dat a pro aplikace řízení. Rovněž je uzpůsobena k součinnosti se simulačním nástrojem prostředí Matlabu Simulinkem, jenž na tuto kartu může přistupovat prostřednictvím knihovny Real Time Toolbox. Rychlá propustnost karty je zajištěna 32bit architekturou. [4]



Obrázek 14: Multifunkční karta MF624 [5]

3.1. Výčet základních parametrů karty MF624

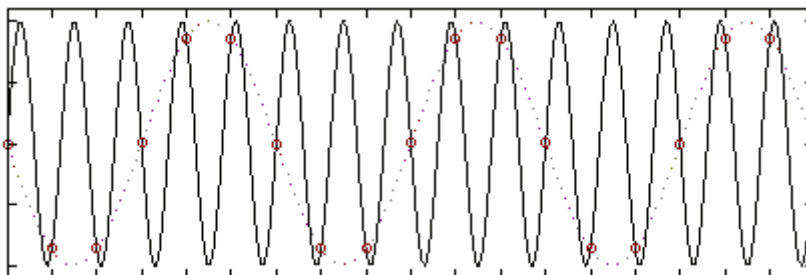
- Osm 14bitových analogových vstupů
- Osm 14bitových analogových výstupů
- Krátká doba převodu
- 8 digitálních vstupů, 8 digitálních výstupů
- 4 vstupy inkrementálních snímačů (diferenciální)
- 4 čítače/časovače
- Nízká spotřeba
- Ovladač pro Real Time Toolbox pro MATLAB
- Ovladač pro Real-Time Windows Target

- Ovladač pro xPC Target
- Ovladač pro Windows, 32 i 64bitové aplikace

3.2. Použití karty MF624

- Měření stejnosměrných napětí
- Připojení převodníků a snímačů
- Měření vibrací a přechodových jevů
- Řízení a monitorování procesů
- Snímání a analýza průběhu
- Vícekanálový sběr dat
- Simulace v reálném čase
- Měření polohy
- Servosystémy
- Pulzně-šířková modulace
- Měření frekvence
- Měření času
- Generování pulzů/frekvence
- Čítání pulsů [4]

Pro účel proměřování filtrů jsou zásadními parametry výstupní rozsah analogového napětí, jenž můžeme odečíst z D/A převodníku, tedy 10V bipolárních, vstupní rozsah analogového napětí je pak rovněž 10V bipolárních. Pro práci se vstupním či výstupním napětím je pro účel proměřování filtrů podstatným parametrem vzorkovací frekvence. Ta je při součinnosti s Real Time Toolboxem možná teoreticky až do 66kHz. S ohledem na Shannon-Kotělnikovův teorém, jenž nařizuje vzorkovat měřený signál s periodou alespoň dvojnásob vyšší, než je frekvence nejvyšší harmonické složky vzorkovaného signálu.

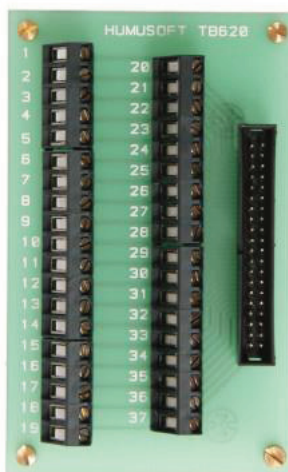


Obrázek 15: Aliasing při nedostatečně hustém vzorkování. [6]

Toto opatření bylo dodrženo k předcházení zkreslení (aliasingu) měřených průběhů z důvodu nedostatečného počtu vzorků pro autentickou rekonstrukci měřeného signálu. Z těchto důvodů proto můžeme filtry analyzovat teoreticky v rozsahu až do 33kHz.

3.3. Konfigurace měřicí karty v prostředí Simulink

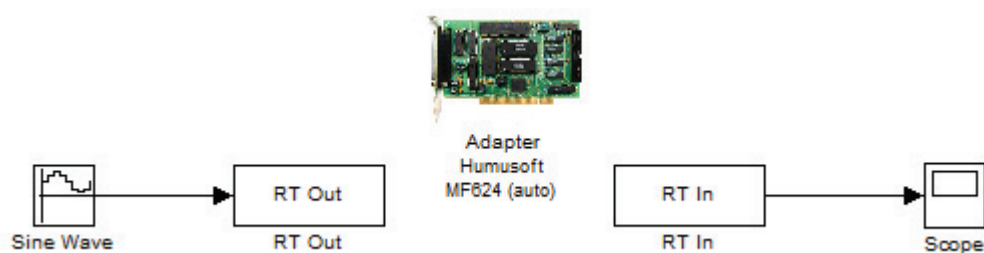
Pracovní stanice použitá pro sběr nebo generování fyzického signálu musí obsahovat měřicí kartu (MF624) připojenou do PCI slotu, univerzální svorkovnici (TB620) pro mechanické zpřístupnění vstupních a výstupních portů. Součástí operačního systému stanice bude ovladač karty MF624, nainstalovaný nástroj Matlab a v něm přidaná knihovna Real Time Toolbox 4.0, jejíž prostřednictvím lze na tuto multifunkční kartu společnosti Humusoft přistupovat.



Obrázek 16: TB620 univerzální svorkovnice [7]

Pro účel proměřování frekvenčních charakteristik bylo vybráno prostředí *Simulink*, jenž pro tento účel umožňuje obsluhovat adaptér MF624. V nabídce *Library Browser* se použily tři bloky zmíněné knihovny *Real-Time Toolbox*, jedná se tedy o *Adapter (MF624)*, *RT Out* a *RT In*. Výběr použité měřicí karty probíhá při vložení bloku *Adapter* do pracovního prostoru modelu *Simulink* (*.mdl), kdy ještě následuje určení řazení zařízení a volba použití čítačů nebo

časovačů. Bloky *RT In* a *RT Out* slouží k přijímání informací z vnějška, respektive k vysílání informací z karty ven. Ve specifikacích je potřeba zvolit číslo kanálu, korespondující s označením na univerzální svorkovnici. Takto lze adresovat až osm analogových vstupů, pro které platí označení *AD0 (1)* pro kanál první až *AD7 (8)* představující kanál osmý, tak dojde k převodu analogového signálu na digitální. Počet analogových výstupů je totožný a liší se označením *DA0 (20)* pro první výstupní kanál až *DA7 (11)* pro poslední osmý kanál. Na pozici pinů číslo 26 až 29 lze nalézt napájecí svorky ($-12V$, $+12V$, $+5V$ a GND), které se uplatní k napájení operačního zesilovače se symetrickým, tak operačního zesilovače s nesymetrickým napájením. Pro doplnění informací stojí za zmínku digitální vstupní kanály na pinech jedenáct až devatenáct a digitálních výstupech na pinech třicet až třicet sedm.



Obrázek 17: Schéma zapojení měřicí karty v modelu Simulink

4. Prostředí Matlab

4.1. Matlab jako komplexní výpočetní nástroj

Matlab je vysokoúrovňový programovací jazyk a interaktivní prostředí pro vývoj algoritmů, vizualizace a analýzu dat, a pro numerické výpočty. S použitím produktu Matlab, můžeme řešit technické počítačové problémy rychleji než u tradičních programovacích jazyků, jako je C, C++, Fortran apod.

Nástroj Matlab může najít využití v širokém spektru aplikací, včetně zpracování signálů, obrazů, komunikace, návrhu řízení, testování a měření, finanční modelování a analýzu, a také ve výpočetní biologii. Matlab navíc umožňuje použití přídatných toolboxů, (sbírka speciálních funkcí Matlabu, jež jsou k dispozici samostatně).

Dále nástroj poskytuje spoustu funkcí pro dokumentování a sdílení práce. Je možné propojit kód vytvořený v Matlabu s jinými jazyky, nebo aplikacemi a tyto algoritmy či aplikace nadále distribuovat.

Matlab nabízí tyto funkce:

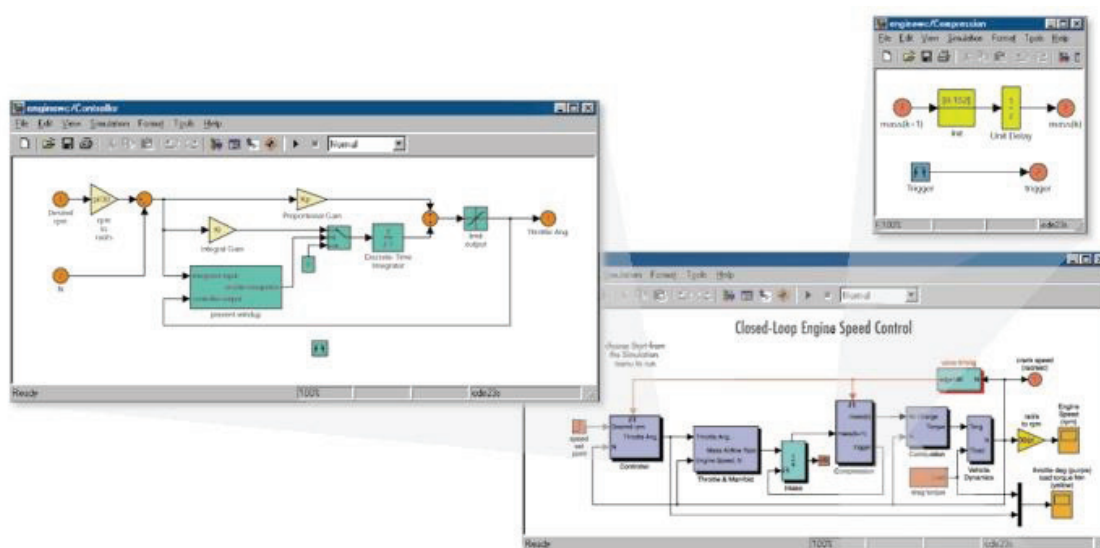
- Vysokoúrovňový jazyk pro technické výpočty
- Vývojové prostředí pro správu příkazů, souborů a dat
- Interaktivní nástroj pro iterační zkoumání, návrh a řešení problémů
- Matematické funkce pro lineární algebru, statistiku, Fourierovu transformaci, filtrování, optimalizaci a numerickou integraci
- 2-D a 3-D grafika pro vizualizaci dat
- Nástroje pro tvorbu vlastního uživatelského rozhraní
- Možnost integrace algoritmu na bázi Matlabu s jinými aplikacemi a programovacími jazyky, jako jsou C, C++, Fortran, Java™, COM, a Microsoft Excel. [8]

4.2. Simulační prostředí Simulink

Prostředí Simulink je rozšíření Matlabu, které umožňuje modelování, simulaci a analýzu dynamických systémů za použití algoritmů Matlabu pro řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Tento nástrojem nabízí snadnou tvorbu nových modelů, nebo úpravu existujících modelů k vlastním potřebám. Simulink podporuje lineární, nebo nelineární systémy, modelované ve spojitém i nespojitém čase, nebo v čase hybridním, tedy kombinaci obou. Pro svou schopnost řešení reálných problémů se Simulink těší oblibě tisícům výzkumníků a inženýrů. Zejména pak v těchto:

- Letectví a obrana
- Automobilový průmysl
- Komunikace
- Elektronika a zpracování signálu
- Medicínská instrumentace. [9]

Klíčovou schopností Simulinku je jeho obousměrné propojení s pracovním prostorem Matlabu. Uživatel tedy může konfigurovat, řídit a sledovat proces simulace prostřednictvím příkazového řádku prostředí Matlabu včetně konfigurace dílčích parametrů použitých bloků. Funkčními modely je možné obohatit stávající knihovnu Simulinku, která tedy může pojmout nástroje třetích stran. Tyto možnosti přispívají k vysoké znovu použitelnosti dílčích výtvorů.



Obrázek 18: Model spalovacího motoru využívá bloky typu Trigger k modelování podmíněně prováděných akcí. Podle úhlu natočení klikového hřídele způsobí spouštěcí puls zážeh ve válci. [10]

4.3. Grafické uživatelské rozhraní v Matlabu

Všechny grafické objekty aplikace Matlab definujeme jako grafické uživatelské prostředí. V původním jazyce, tedy angličtině se toto prostředí nazývá Graphic User Interface (se zkratkou GUI). Uživatel musí vykreslovat grafické objekty v editoru zdrojových textů manuálně. Takto vytvořená GUI můžeme klasifikovat jako optimální, neboť jeho grafické prostředí je přesně definováno a neobsahuje redundantní prvky či informace.

Jinou metodou postupu při tvorbě grafického prostředí je nástroj GUIDE (Graphic user Interface Development Environment), jež je v systému Matlab integrován. GUIDE umožňuje

uživateli generovat všechny grafické prvky. Proto je toto prostředí vhodné zejména pro začátečníky. Po spuštění toto GUIDE vede uživatele interaktivně, kdy stačí vybrat grafický objekt a přetáhnout jej do pracovního prostoru. Následně lze zadat jeho parametry. Jedná se tedy o časově nenáročné řešení s vysokou mírou znovu použitelnosti.

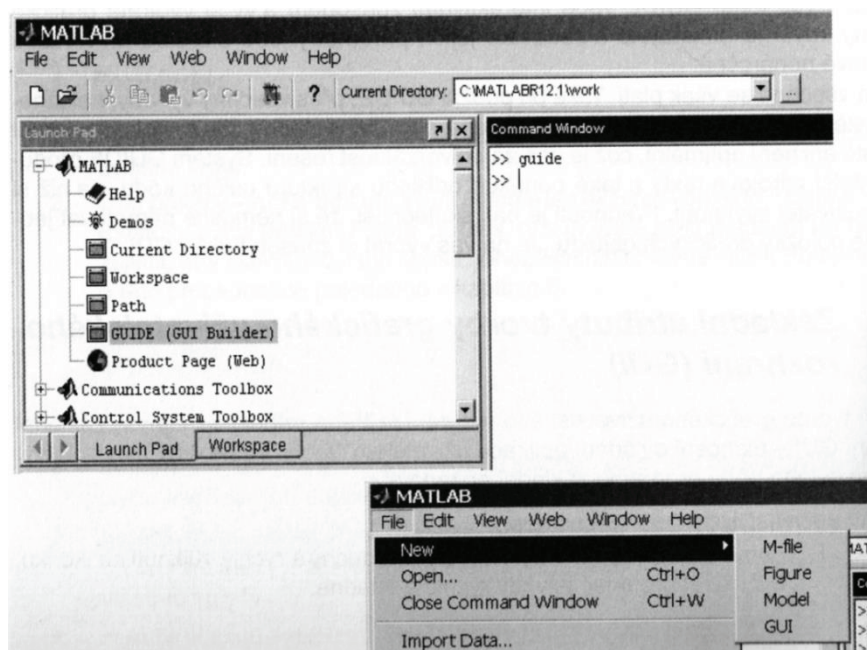
Univerzálnost této metody však způsobuje negativní vlastnosti. Výsledný kód totiž obvykle není optimální, GUIDE se totiž vyznačuje odlišnou strukturou kódu, než na kterou jsme zvyklí při práci v Matlabu. Výsledný kód je rovněž delší, avšak není nutno si jej pamatovat.

Při tvorbě grafického uživatelského rozhraní je nutno dbát základních atributů- GUI má uživateli ulehčit práci, k čemuž by měly být splněny následující požadavky:

- Jednoduchost
 - uživatel by se v aplikaci měl rychle zorientovat a snadně tuto aplikaci ovládat.
- Provázanost (nutnost zajištění návratu)
 - Ovládání by mělo být přehledné v celém průběhu aplikace - uživatel se v příkazech nesmí ztratit.
- Komplexnost
 - Musí být ošetřeny veškeré kombinace vstupních, případně výstupních proměnných. [11]

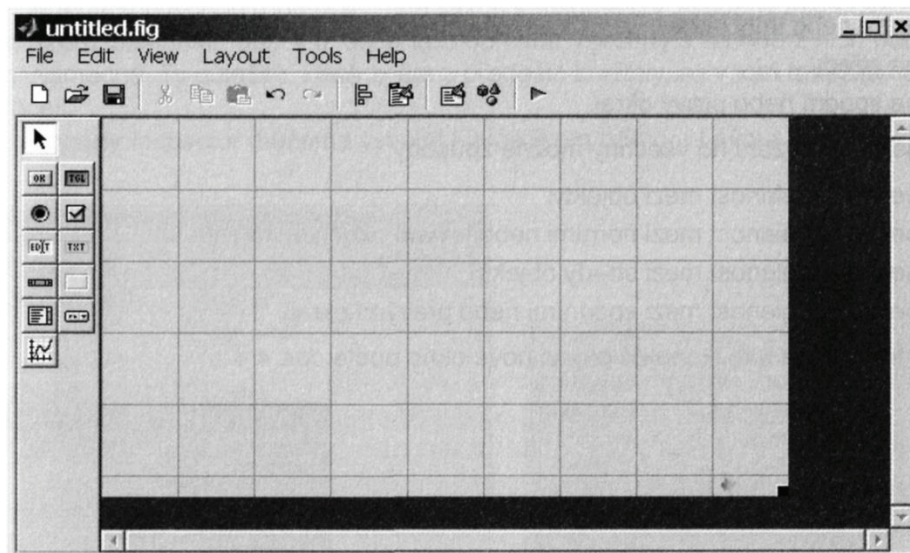
4.4. Prostředí GUIDE

Průvodce tvorbou GUI Graphic User Interface Development Environment (prostředí pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní) je interaktivní prostředí, které obsahuje veškeré grafické objekty typu uicontrol, s pomocí nichž lze řídit běh programu (aplikace). Vytvořené GUI bude posláno uloženo ve formátu *.fig a jeho stejnojmenný zdrojový kód pak do souboru s příponou *.m. Spuštění tohoto nástroje lze provést třemi různými způsoby, jež popisuje Obrázek 4. První metodou je tedy spuštění z okna Lanuch Pad, další je pak příkaz guide do okna Command Window, poslední možností je prostřednictvím nabídky File/New/GUI. Kde pak uživatel rovněž může otevřít vytvořené soubory s příponou *.fig. [11]



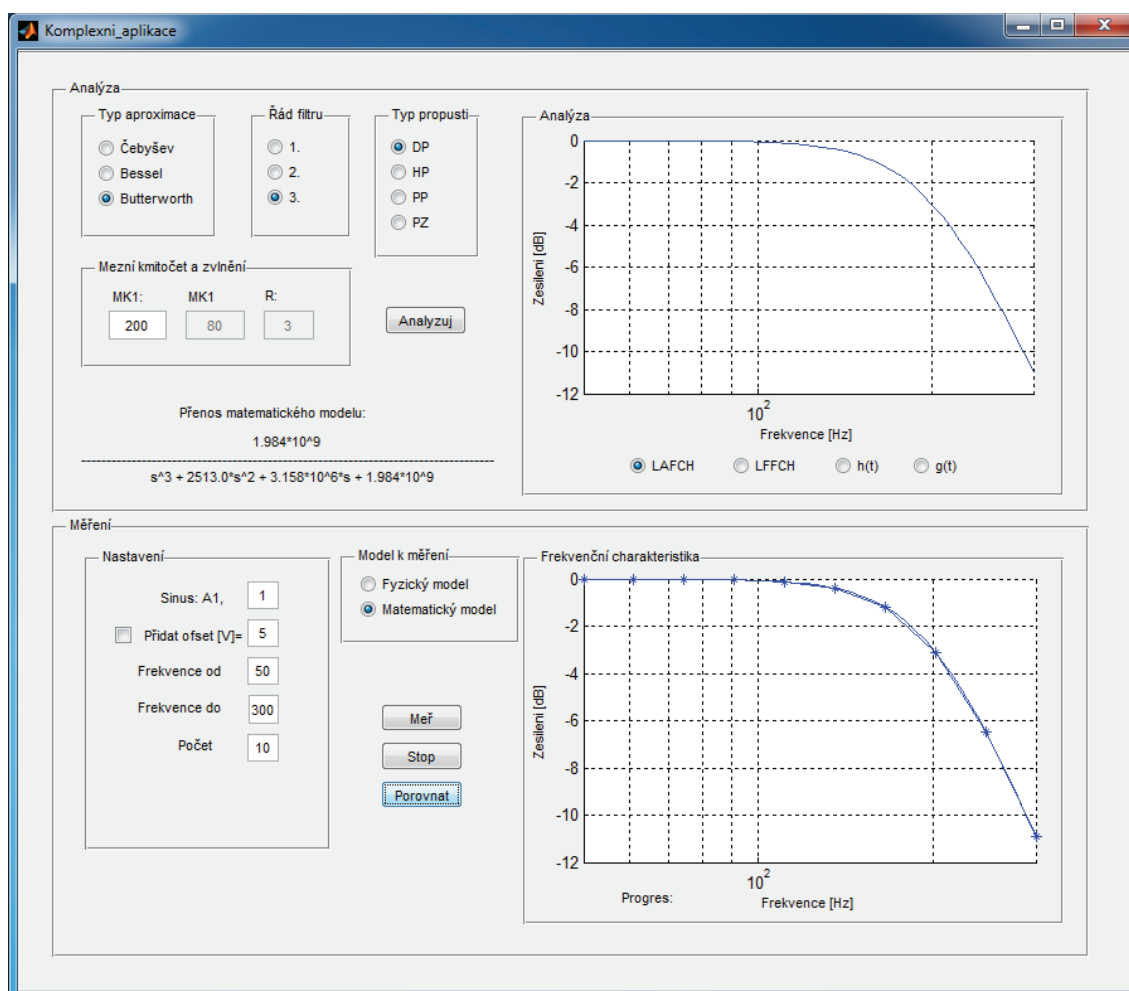
Obrázek 19: Metody pro otevření GUIDE [11]

Úvodní obrazovku můžeme rozdělit na základní tři části. Pracovní plocha Layout Area je tvořena čtvercovou sítí, jejíž velikost lze libovolně přetažením pravého spodního rohu měnit. Velikost pracovní plochy by neměla přesahovat rozsah použitých komponentů. Komponenty najdeme tedy na levé části okna s názvem Component Palette, na niž se nacházejí veškeré objekty unicontrol. Na vrchní části okna se nachází obvyklá tlačítková lišta pro správu okna.



Obrázek 20: Vzhled Průvodce tvorbou GUI po jeho spuštění [11]

5. Komplexní aplikace pro návrh a analýzu filtrů spojitých v čase

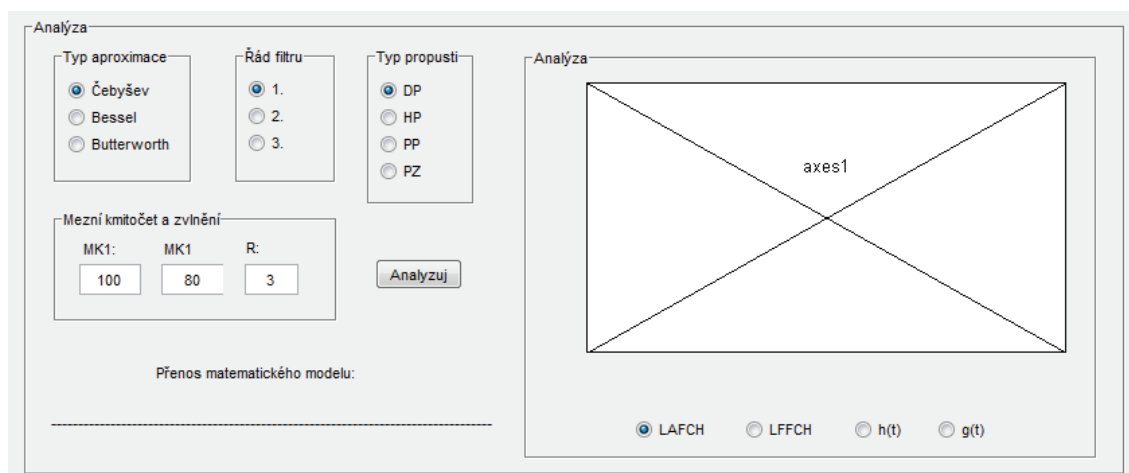


Obrázek 21: Okno komplexní aplikace

Grafické uživatelské rozhraní se skládá ze dvou částí, *Analýza* a *Měření*, pro možnost porovnávání skutečných frekvenčních charakteristik s charakteristikami matematického modelu příslušného filtru. Svrchní část tedy uživateli nabízí zobrazit průběhy matematického modelu a spodní pak změřit amplitudovou frekvenční charakteristiku skutečného filtru. Funkčnost obou částí je na sobě nezávislá, až na výjimku specifikace zobrazovací oblasti, které je společná pro autentické porovnávání amplitudové frekvenční charakteristiky. Stisknutím tlačítka *Analyzuj* bude provedeno vykreslení charakteristiky nebo průběhu, odpovídajících zadaným vstupům. Ke spuštění obslužného programu nastane po stisknutí tlačítka *Meř*. V takovém případě se měřící proces spustí s předdefinovanými hodnotami vstupních parametrů. Tyto však nemusí být vhodné ke korektnímu proměření dané soustavy. Ideálním postupem je opatřit si před samotným

měřením základní informace o uvažované soustavě. Pro horní propusti nás bude více zajímat oblast frekvenční charakteristiky ve vyšších hodnotách, u dolní propusti je pak situace opačná. Nastavení širokého kmitočtového spektra měření sice možné je, nicméně při zachování stejného počtu měřených frekvencí bude tento postup méně přesný. Zbytečně pomalé měření nastane v případě měření horní propusti, neboť pokud měřené kmitočtové spektrum obsáhne vyšším počtem vzorků, bude nás brzdit nepotřebná spodní oblast spektra. Pokud tedy soustavu známe, je vhodné nejprve provést výpočet oknem *Analyza* a tomu pak přizpůsobit frekvenční oblast (*Frekvence od* a *Frekvence do*). Dalším úskalím, se kterým je možné se během měření setkat, nastane, chceme-li proměřovat aktivní filtry s nesymetrickým operačním zesilovačem. V takovém případě dojde k limitaci záporných složek signálu na výstupu soustavy a měření bude nekorektní. Řešením takové situace může být použití offsetu, pro posunutí měřeného signálu do bezpečné oblasti, kde si již algoritmus poradí korektně. V takovém případě ale musíme dbát nastavení amplitudy generovaného signálu, aby součet offsetu a amplitudy nepřesáhl fyzický limit. Po provedení analýzy a kompletního měření je možné oba průběhy porovnat tlačítkem *Porovnej*, což má za následek přenesení vypočteného průběhu do pole s průběhem změřeným, přičemž skutečný průběh bude proložený body, jak je také uvedeno na obrázku 22.

5.1. GUI pro analýzu matematického modelu filtru

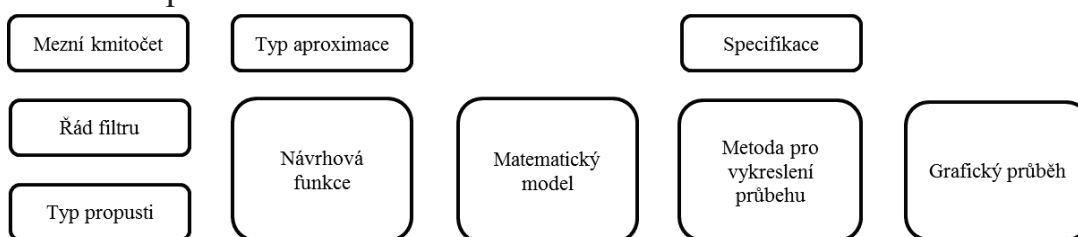


Obrázek 22: Okno k analýze filtrů v prostředí GUIDE

Okno pro analýzu tedy vytváří matematický model virtuálního filtru a na základě jeho přenosu pak lze vykreslit amplitudovou a fázovou frekvenční charakteristiku v logaritmickém měřítku, nebo odezvu soustavy na jednotkový skok, resp. na jednotkový impuls. Dílčí parametry filtru je potřeba zadat před stisknutím tlačítka *Analyzuj*. Jedná se o následující parametry: *Typ aproximace*, *Řád filtru*, *Typ propusti*, *Mezní kmitočet* a případné zvlnění *R*. Pro nastavení zobrazovací oblasti frekvenčních charakteristik slouží pole *Frekvence od* a pole *Frekvence do*, jejichž hodnoty také ovlivňují frekvenční rozsah, na kterém se má měřit reálná soustava,

případně matematický model soustavy. Volba typu aproximace filtru, řádu filtru a typu propusti probíhá výběrem vždy jen jedné možnosti z několika, což je zajištěno funkcionalitou panelu *Button Group*. Mezní kmitočet a případná míra zvlnění u aproximace Čebišev se zadávají prostřednictvím komponenty *Edit Text*. Jednotlivé prvky jsou pro možnost dílčího zpracování uživatelské volby identifikovány pod klíčem *Tag*. Okamžitá reakce na uživatelskou volbu, nebo jiného zadání vstupního parametru (proměnné) je zpřístupněno voláním metody *Callbacks*, jenž se uplatní k inicializaci, případně k přerušení příkazů, nebo jako i kontrola správnosti zadaných vstupních parametrů. Nevýhodou je však standardně nemožnost interakce mezi dílčími voláními. Ke znovupoužití lokálních výstupů byla použita metoda *handles* vázána právě na některý z prvků použitých v grafickém uživatelském rozhraní.

5.1.1. Popis řešení



Obrázek 23: Struktura řešení aproximace

Vstupem řetězce jsou již zmíněné parametry: *Mezní kmitočet*, *Řád filtru*, *Typ propusti* a také *Typ aproximace*, který však určuje návrhovou funkci, přičemž ostatní proměnné figurují jako argumenty této funkce. Přečtení a zpracování těchto argumentů (proměnných) probíhá v rámci podfunkce *callback*, vyvolané tlačítkem *Analyzuj*, stejně jako proces zobrazení grafického průběhu. Příklad funkce pro výpočet modelu Butterworthova filtru:

```
[b,a] = butter(Vyber_rad,(Wp*(2*pi)),Vyber_propust,'s'); %funkce pro výpočet modelu Butterworthova filtru
```

kde *Vyber_rad*, *Wp*, a *Vyber_propust* jsou pomocné proměnné, do kterých byla v rámci totožného volání přiřazena hodnota ze vstupů: *Wp* je proměnná, ke které byl přiřazen zadaný mezní kmitočet, neboť v případě výpočtu Čebyševovy, nebo Butterworthovy aproximace a současné volbě pásmové propusti či zádrže, je tato proměnná uložena jako vektor se dvěma prvky (dolní i horní zlomová frekvence). Pro výpočet analogového filtru je potřeba ve funkci uvést řetězec 's'. Samotný přenos vstupů do pomocných proměnných k následnému zpracování, je realizován metodou *get*, s převodem datového typu na *double* z původního řetězce *String*. Příklad přečtení hodnoty prvního mezního kmitočtu:

```
mek1 = str2double(get(handles.mk1,'String')); %převod a následné uložení vstupu první mezní kmitočet
```

Obdobným způsobem jsou načteny i ostatní proměnné. Návratovou hodnotou funkce je Laplaceův obraz filtru, vyjádřený dvěma vektory *b* a *a*, jejichž velikost je rovna řádu filtru plus jedna. Prvky těchto vektorů představují koeficienty polynomů racionální lomené funkce ve tvaru:

$$H_{(s)} = \frac{B_{(s)}}{A_{(s)}} = \frac{b(1)s^n + b(2)s^{n-1} + \dots + b(n+1)}{s^n + a(2)s^{n-1} + \dots + a(n+1)}$$

kde: $H_{(s)}$ je tedy Laplaceův obraz,

$B_{(s)}$ je polynom ve jmenovateli,

$A_{(s)}$ je polynom v čitateli,

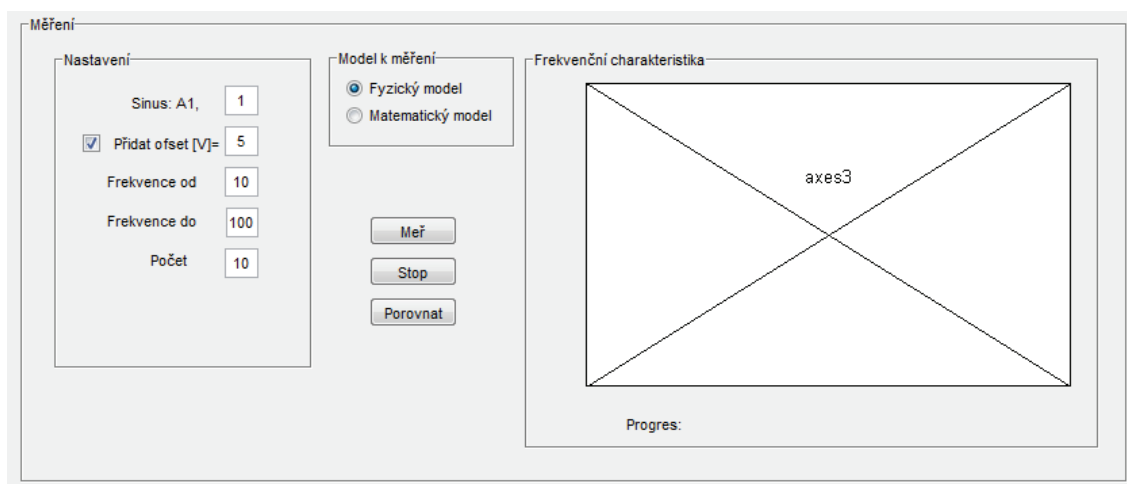
s je Laplaceův operátor. [12]

Specifikace vykreslení představuje nastavení frekvenční osy a výběr požadovaného výstupního průběhu. K vykreslení frekvenčních charakteristik je použita funkce *freqs*, která má jako parametry právě vytvořený matematický model a w , což je definici frekvenční osy v logaritmickém měřítku. Příklad použití funkce *freqs*:

```
[H,W]=freqs(b,a,w);
```

přičemž funkce vrací radiální frekvenční charakteristiku v komplexní rovině. Úpravu pro vyobrazení amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky lze nalézt v příloze, stejně jako použití ostatních funkcí a metod k vykreslení odezev.

5.2. GUI k proměrování reálných filtrů



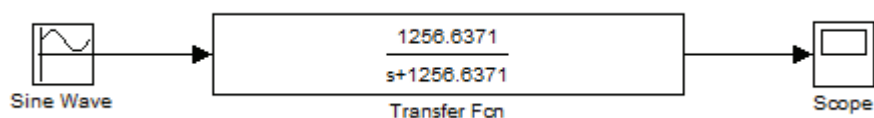
Obrázek 24: Vytvoření části grafického uživatelského rozhraní k proměrování reálných filtrů

Tato část aplikace bude generovat výstupní signál se specifickými parametry, přičemž bude sledovat odezvu měřené soustavy. Konfigurace procesu, jako amplituda a offset generovaného signálu, frekvenční oblast a počet měřených frekvencí se nachází v panelu *Nastavení*, obdobně jako v předešlém případě jsou parametry nastavení přečteny, až po spuštění měřicího procesu možností *Měř*. Poté bude provedeno autonomní postupné proměření všech frekvencí spektra. Po provedení analýzy se výsledná frekvenční charakteristika přenesou do grafu *axes3*, v logaritmickém měřítku. To platí při volbě Fyzického modelu, čemu odpovídá zapojení na Obr.

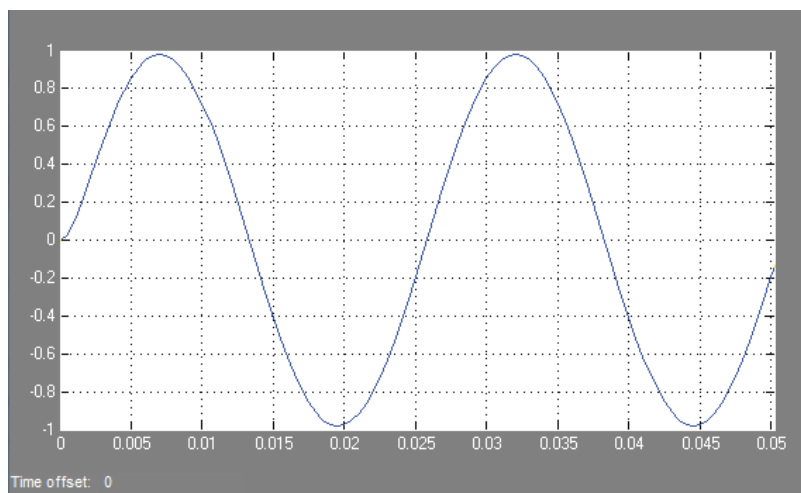
17. Přepínání modelu měření se uplatnilo, jako účinný nástroj ověření funkčnosti samotného algoritmu proměřování. V případě volby *Matematického modelu* se vybere příslušný model zapojení Simulink viz Obr. 25, který obsahuje generátor sinusového signálu *Sine Wave*, blok virtuálního modelu *Transfer Fcn* a osciloskop *Scope* ke sběru dat. Do virtuálního modelu se po spuštění měření přenese obraz filtru z *Analýzy*. Za předpokladu, že jsou koeficienty pólů dostupné, dojde k jejich importování do bloku *Transfer Fcn* příkazy:

```
set_param('sber/Transfer Fcn', 'Denominator', ['1', num2str(a), '1']);
set_param('sber/Transfer Fcn', 'Numerator', ['1', num2str(b), '1']);
```

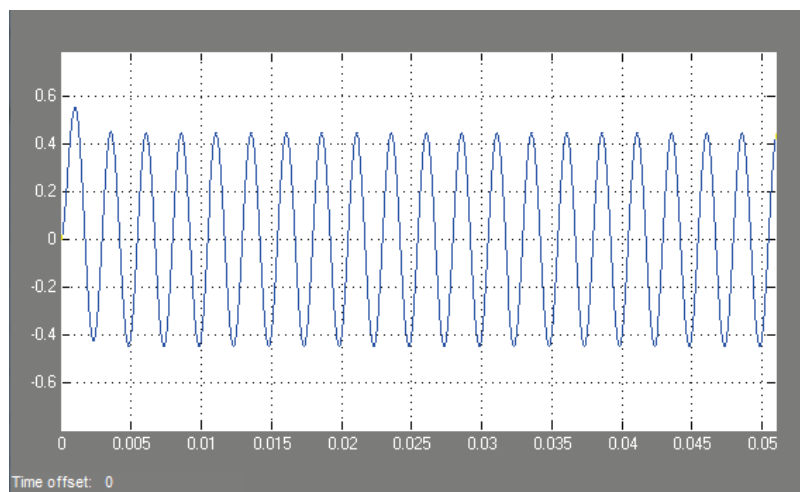
kde *sber* představuje název souboru simulace Simulinku pro matematický model. Po otevření již obsahuje přenos vypočtené soustavy. Uvedená soustava je přenosem dolní propust prvního řádu s mezním kmitočtem 200 Hz:



Obrázek 25: Analýza virtuální soustavy



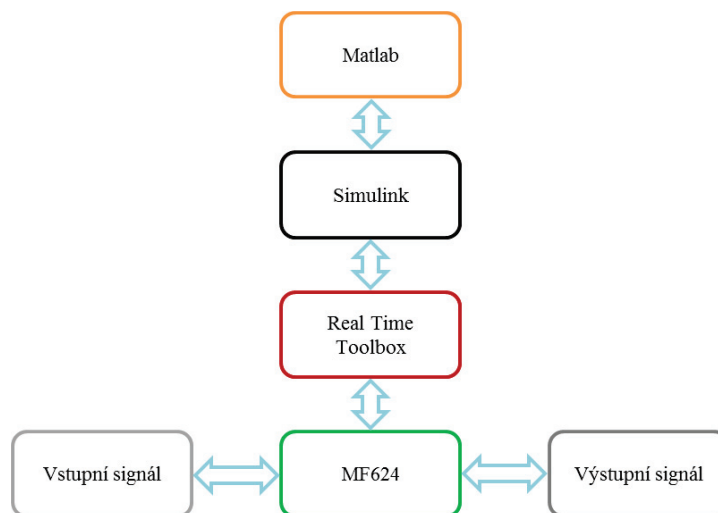
Obrázek 26: Odezva totožné soustavy při kmitočtu 40 Hz



Obrázek 27: Odezva soustavy při kmitočtu 400 Hz

Na Obrázku: 26 a 27 můžeme pozorovat odezvy soustavy prvního řádu dolní propusti při odlišných hodnotách kmitočtu vstupního signálu. Při vyšších útlumech se u filtrů projevuje pomalejší reakce ustálení. Dalším poznatkem je, že při vyšších kmitočtech, k věrohodnému vyšetření soustavy již nepotřebujeme tak dlouhý čas simulace jako při kmitočtu nízkém. S těmito skutečnostmi se při návrhu měřicího systému počítat.

5.3. Měřicí řetězec

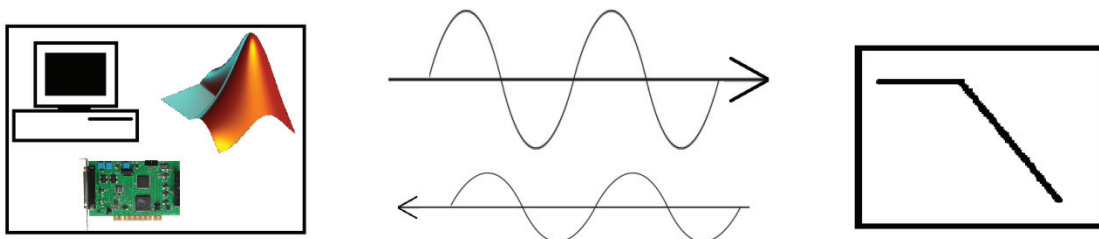


Obrázek 28: Blokový diagram přístupového řetězce

Přenos informací mezi Simulinkem a Matlabem je umožněn prostřednictvím metod zadaných do příkazové řádky zejména pro přístup k použitým blokům v simulacích, ke čtení, nebo zadávání parametrů. Další metodou sdílení dat je úložiště Workspace, kam lze výsledky analýzy

ukládat. Časová spojitost je plně v režii Simulinku, jehož době simulace odpovídají časově vázané proměnné. Do prostředí Simulink je možno importovat adaptér (MF 624) včetně přidružených bloků pro možnou práci s touto kartou a jejími fyzickými vstupy a výstupy z vestavěné knihovny Real Time Toolbox, jež obsahuje ovládače k použitým kartám.

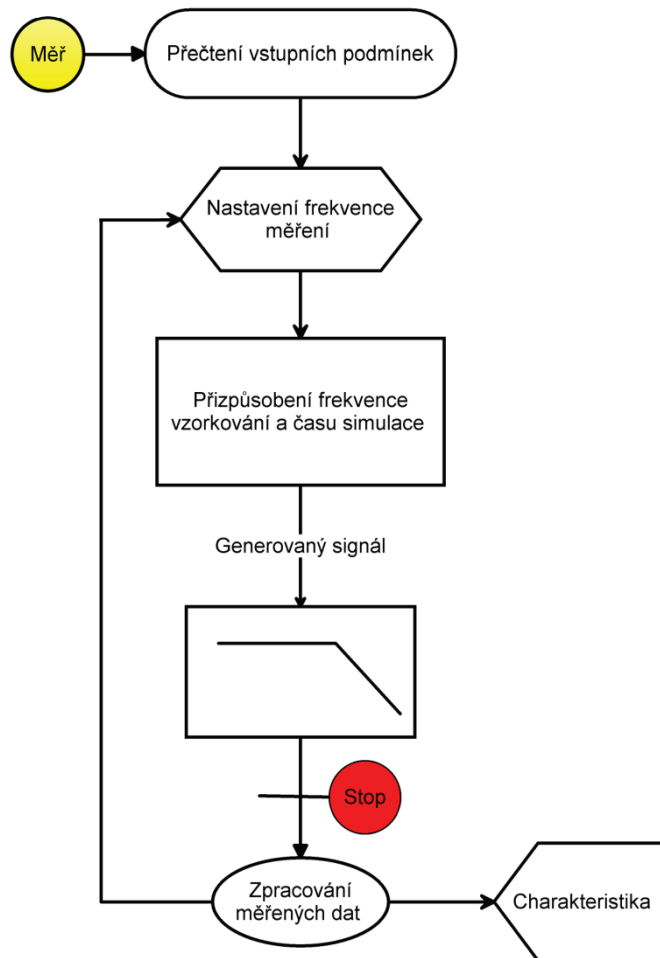
5.4. Proměňování soustav



Obrázek 29: Blokové schéma měřicího řetězce

Změření frekvenčních charakteristik soustavy probíhá přivedením řízeného harmonického signálu na vstup soustavy s následným sledováním reakce soustavy (filtru) na tento vstupní signál pro všechny kmitočty měřeného frekvenčního rozsahu. Je tedy nutné vytvořit generátor, který krokově mění frekvenci přivedeného napětí a ke každému kroku pak zaznamenat amplitudu ustáleného napětí na výstupu soustavy. Logaritmickou frekvenční charakteristiku pak můžeme sestavit uspořádáním, dvacetinásobku dekadických logaritmů přenosů, určených podílem amplitudy ustálených odezev a amplitudy vstupního signálu, na příslušné frekvenci. Nutnou výbavou, umožňující měřit frekvenční charakteristiku reálných filtrů je osobní počítač se softwarovou výbavou Matlab, disponující také slotem PCI, do kterého může být připojena multifunkční měřicí karta s vyvedenou svorkovnicí, umožňující propojení měřené soustavy (filtru). Případně ještě dodateční napájení pro uvažovanou soustavu.

5.5. Algoritmus měření



Obrázek 30: Struktura algoritmu měření

Po stisknutí tlačítka *Meř*, dojde k zavolání obslužného programu metodou *callback*. Program provede chronologicky několik kroků. Na začátku algoritmu se provede přečtení zadaných, nebo původních vstupních proměnných jako frekvenční pásmo s počtem kroků generovaného signálu, čemuž bude také přizpůsoben měřicí systém. Zadané frekvenční rozmezí se zpracuje v logaritmickém měřítku a plynule rozdělí podle příslušného počtu kroků. Následuje přizpůsobení vzorkovací frekvence a času simulace. Tyto musí být přizpůsobeny k efektnímu vzorkování při zachování Shannonova teorému. Doba prokladu mezi vzorky byla stanovena vztahem:

$$T_s = \frac{1}{N_{vz} \times D_{+1}}$$

kde T_s je tedy doba prokladu mezi vzorky, resp. převrácená hodnota vzorkovací frekvence simulace v prostředí Simulink.

N_{vz} značí požadovaný počet vzorků na periodu a

D_{+1} znamená násobení hodnotou nejbližší vyšší dekády, pro předcházení ztrátě dat.

Příklad použití pro frekvence v rozmezí 9 a 90 Hz:

<pre>elseif frekvence>9&&frekvence<=90 Ts=1/(20*100)</pre>
--

a čas simulace se přizpůsobí posléze vztahem:

$$cas_{simulace}(n) = pocet_{dat} \times T_s$$

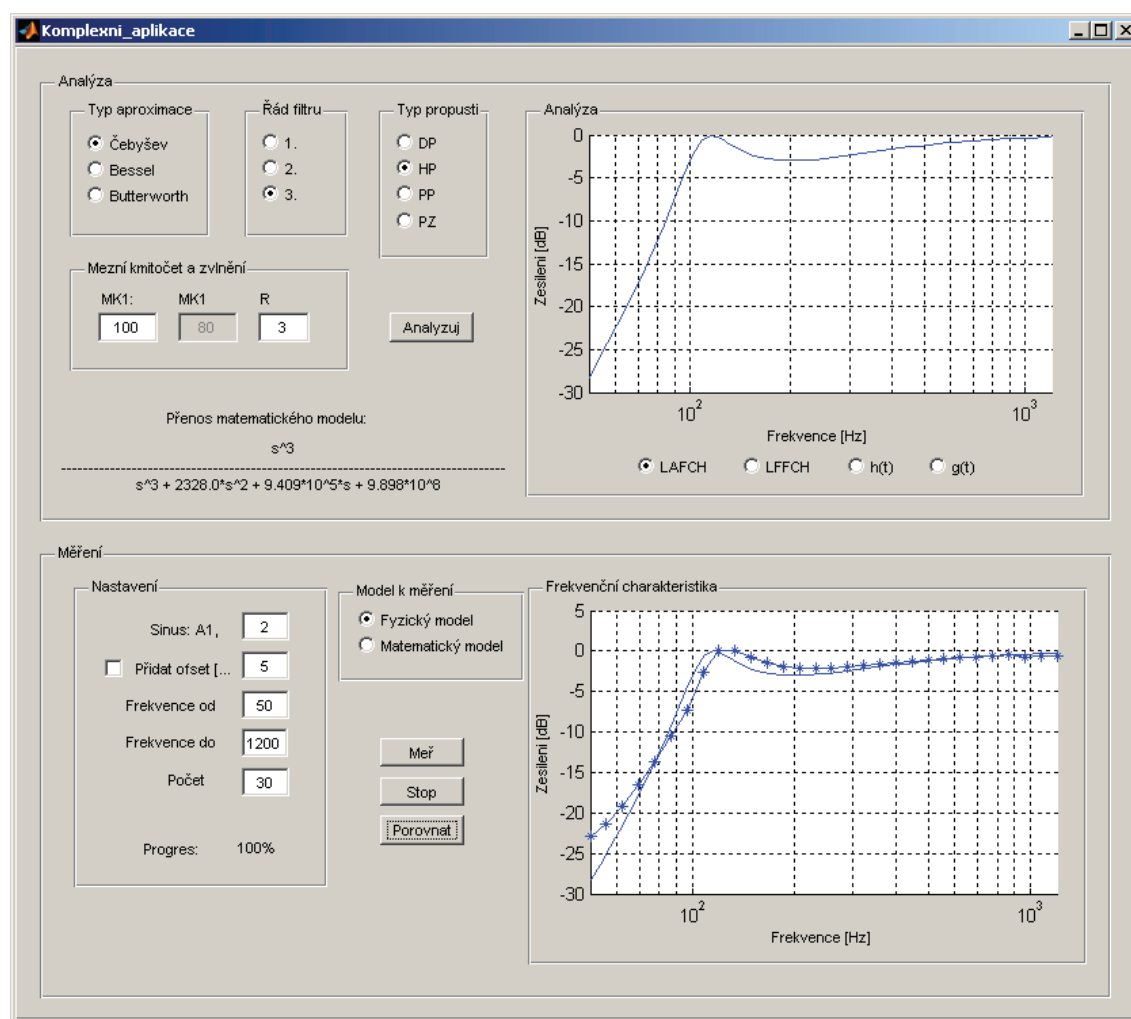
kde $cas_{simulace}(n)$ představuje dobu simulace v sekundách pro konkrétní kmitočet (n), času bude definovaných tolik, na kolik kroku je rozděleno frekvenční pásmo,

$pocet_{dat}$, udává množství vzorků, které budou po měření zpracovány, nastavená je pevně na hodnotu 3000. Tímto vztahem lze docílit času simulace adekvátního rychlosti sběru vzorků.

Nyní program provede přesné nastavení generovaného výstupního signálu, který bude vstupovat do soustavy dle volby uživatele, do fyzické, nebo virtuální soustavy. Po provedené simulace proběhne přenos změřených vzorků z bloku *Scope* jako dvourozměrné vektorové pole hodnot (čas a numerická hodnota vzorku). Zpracování dat spočívá v separaci vzorků a následného omezení jeho hodnot začátku simulace, kdy se ještě soustava nemusí být ustálená. Spolehlivá hodnota je tedy pět set posledních vzorků. Amplituda pro daný kmitočet se následně stanoví jako rozdíl maxima a minima, podělený dvojnásobkem hodnoty amplitudy generovaného signálu. Vykreslení amplitudové frekvenční charakteristiky probíhá vyobrazením výsledných amplitud vůči příslušným frekvencím měření.

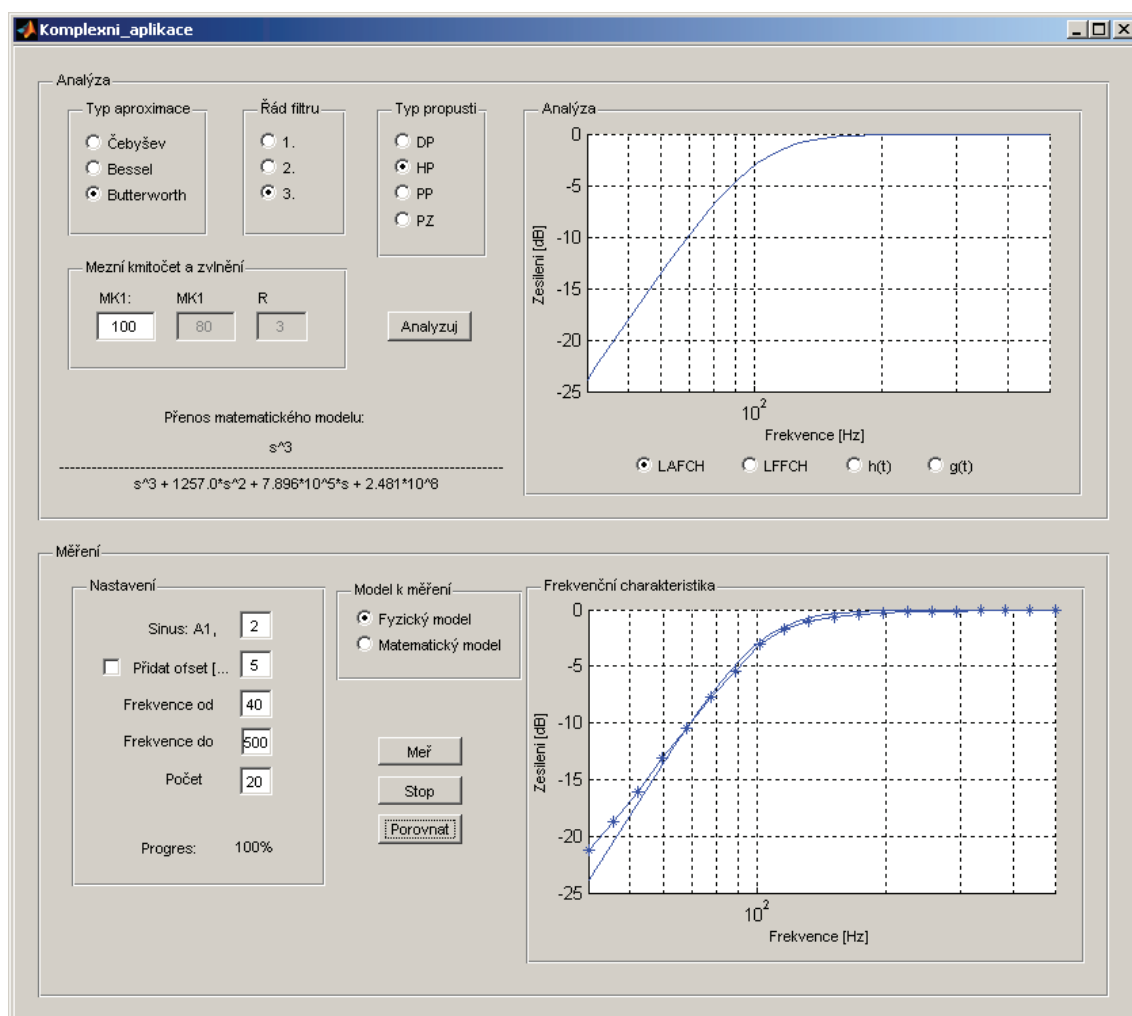
6. Zhodnocení dosažených výsledků

Měření proběhlo na dvou různých konfiguracích. První tři měření proběhly na výkonnější dvou jádrové konfiguraci, poslední pak na pracovní stanici s jednojádrovým procesorem. Rozdílná výkonost se odrazila Rozdílná výkonost se projevila na chybovosti měření, neboť na rychlejší pracovní stanici nedocházelo k výpadkům měření z důvodu nedostatečného výpočetního výkonu. Na obr. 35 si můžeme všimnout fluktuaci frekvenční charakteristiky při různých frekvencích měřeného spektra.

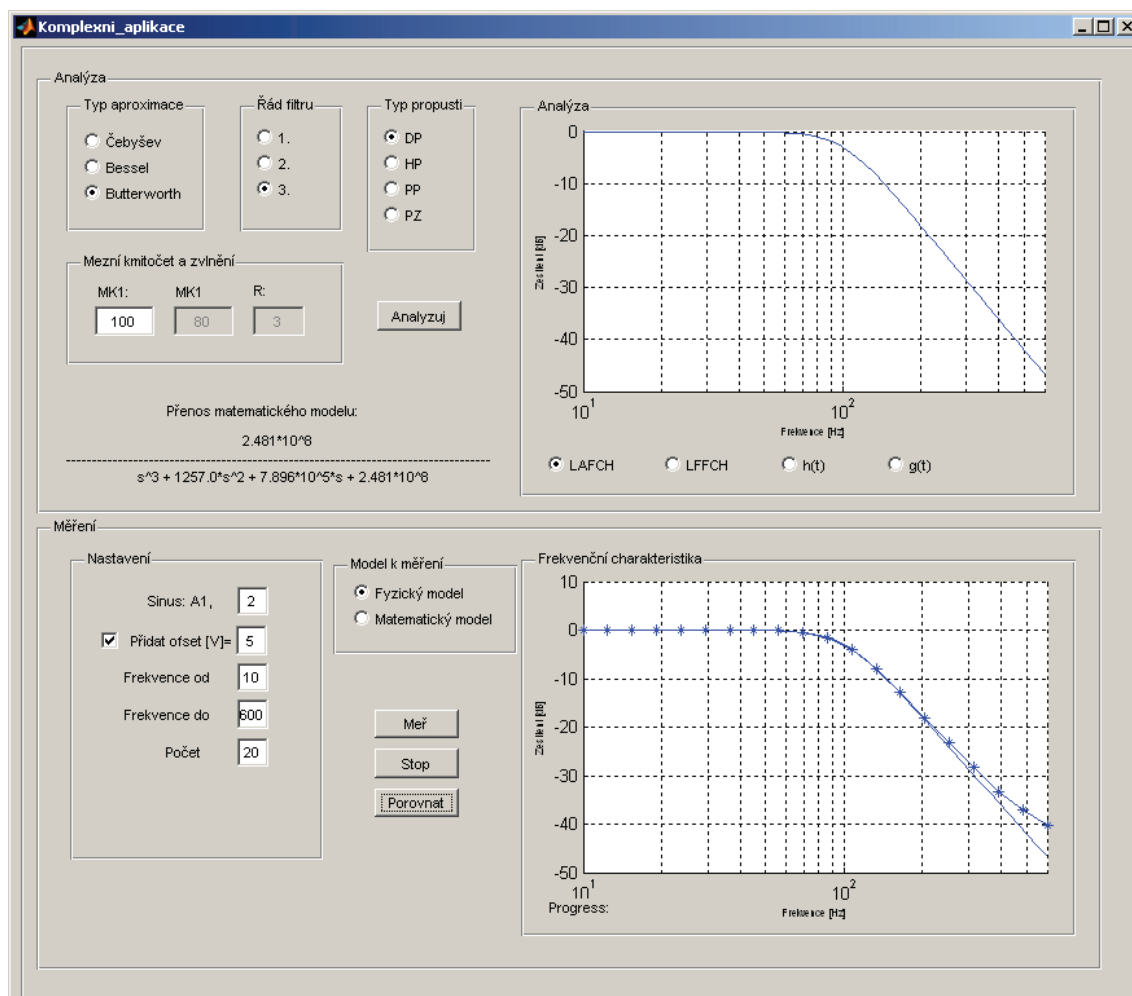


Obrázek 31: Analýza a měření aktivního Čebyševova filtru 3. řádu HP porovnání

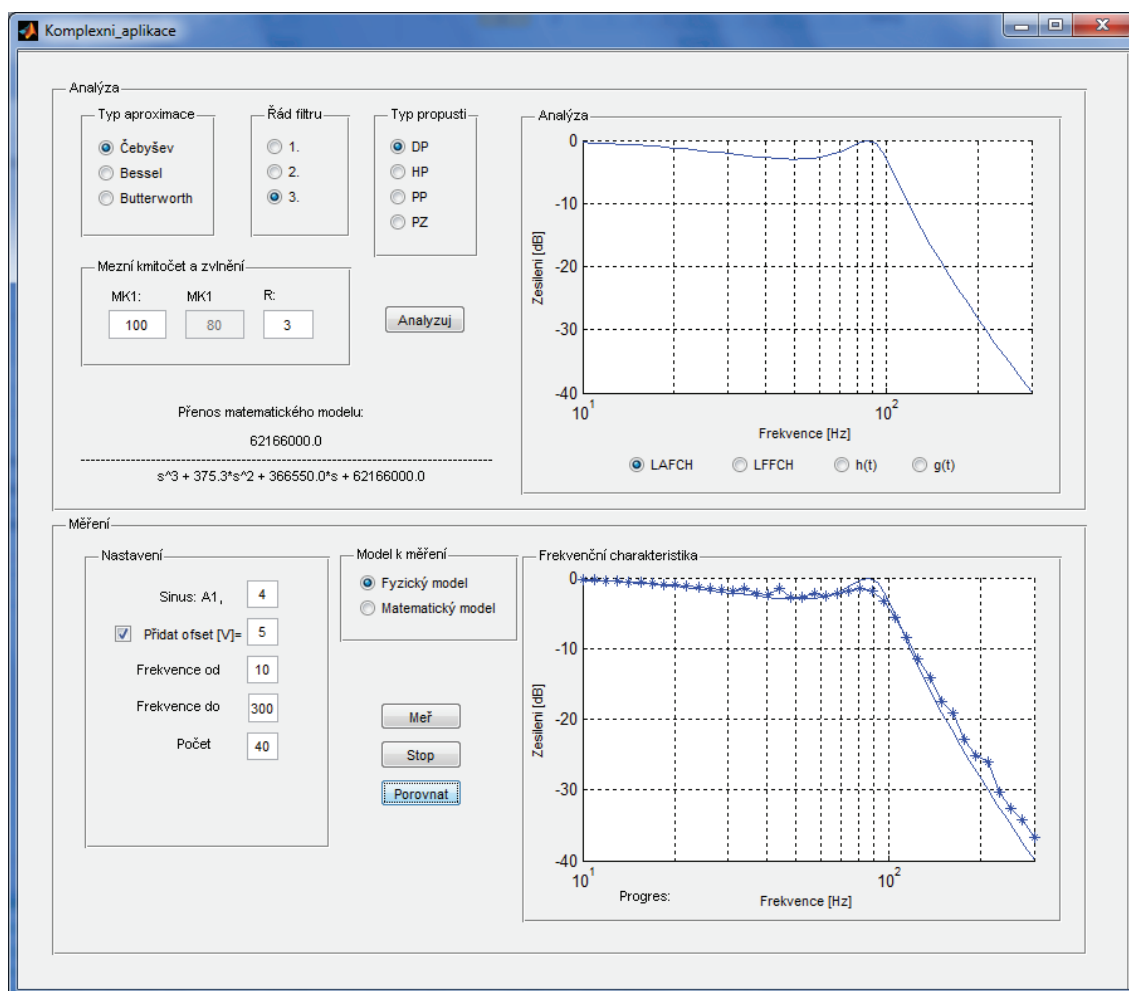
Zdejší nesoulad úrovně mezního kmitočtu přisuzují nesouladu mezních kmitočtů mezi soustavami, způsobenou drobnou odchylkou nastavení potenciometru.



Obrázek 32: Analýza a měření aktivního Butterworthova filtru 3. řádu HP porovnání

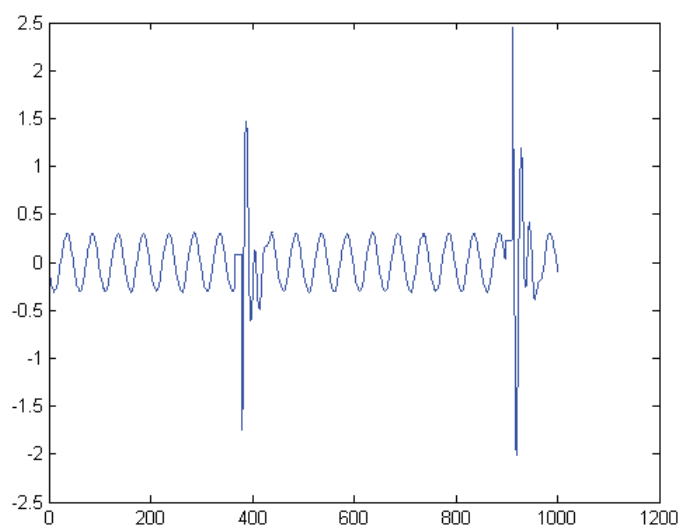


Obrázek 33: Analýza a měření aktivního Butterworthova filtru 3. řádu DP porovnání



Obrázek 34: Analýza a měření aktivního Čebyševova filtru 3. řádu DP porovnání

Nepřesnost v oblastech útlumu byla způsobena působením vnějšího rušení, které se projevilo tím významněji, čím byly hodnoty útlumu vyšší. Pro názornou ukázkou bylo provedeno vykreslení posledních tisíce vzorků dat:



Obrázek 35 Rušení při měření horní propusti na kmitočtu 40 Hz

Závěr

Snahou práce bylo přiblížit problematiku chování analogových při jejich základním použití filtrů interaktivní formou. Bylo využito dostupných prostředků. Možnosti matematického vyjádření by mohlo být více, nicméně použité knihovny disponují základními aproximací pro vytvoření dostatečné představy o fungování a významu kmitočtových filtrů. Algoritmus měření amplitudové charakteristiky byl navržen se snahou o optimální využití dostupných výpočetních prostředků. Proměřovací algoritmus byl vyvíjen při odezvě matematického modelu, kdy výsledky naplnily očekávané. Měření probíhalo bez výpadků, které by právě mohl způsobit nedostatečný výpočetní výkon. Po sestavení fyzického modelu došlo k reálným testům, kdy se právě nedostatečný výkon projevil. Mimo nahodilých chyb se také projevilo rušení, ovlivňující měřicí proces na celém rozsahu frekvenční charakteristiky. Většinou se toto rušení projevovalo v oblastech útlumu nižší než -15dB , tedy v oblastech zádrže. Možným omezením vlivu parazitního šumu, může představovat průměrování amplitud dílčího vzorku. Pokus o toto řešení však úspěšný nebyl, patrně kvůli větší náročnosti na výpočetní výkon. Další možností pro případné experimentování může být použití více pracovních stanic, které by také mohlo řešit otázku fázové frekvenční charakteristiky.

Citovaná literatura

1. HÁJEK, Karel a Jiří, SEDLÁČEK. *Kmitočtové Filtry*. Praha : BEN, 2002. 80-7300-023-7.
2. PAARMANN, Larry D. *Design and analysis of analog filters*. [pdf] Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001. 0-7923-7373-1.
3. KAŠPER, Ladislav. *Návrh kmitočtového filtru*. [pdf] Ostrava 2012 : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky, 2012.
4. *MF624: MULTIFUNCTION I/O CARD*. [pdf] Praha : HUMUSOFT s.r.o., 2006.
5. MF624 - Měřicí karty | Humusoft. *Technické výpočty, řídicí technika, simulace* | Humusoft. [Online] HUMUSOFT, 2013. [Citace: 4. Květen 2013.]
<http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/mf624/>.
6. TEZAUR, Radka. Co se děje, když se obrázky zmenšují a zvětšují - PALADIX foto-on-line. *PALADIX foto-on-line*. [Online] PALADIX foto-on-line. [Citace: 4. Květen 2013.]
<http://www.paladix.cz/clanky/co-se-deje-kdyz-se-obrazky-zmensuji-a-zvetsuji.html>.
7. Měřicí karty - MF624 AD622. *Technické výpočty, řídicí technika, simulace* | Humusoft. [Online] HUMUSOFT. [Citace: 4. Květen 2013.]
<http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/mf624/>.
8. Product Description - MATLAB & Simulink. *MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing*. [Online] The MathWorks, Inc, 2013. [Citace: 4. Květen 2013.]
http://www.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html.
9. *Simulink® 7: Getting Started Guide*. [pdf] Natick : The MathWorks, Inc, 2008.
10. Simulink - Simulace a Model-Based Design | Humusoft. *Technické výpočty, řídicí technika, simulace* | Humusoft. [Online] HUMUSOFT . [Citace: 4. Květen 2013.]
<http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/simulink/>.
11. ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací*. Praha : BEN, 2004. 80-7300-133-0.
12. SROVNAL, Vilém. *KYBERNETIKA*. [pdf] Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008.

Seznam příloh

Příloha I: CD-ROM

Obsah disku CD-ROM

Wertheim.pdf

Hlavní části programu.pdf

Pásmová propust a pásmová zádrž matematicky.pdf

Tištěné spoje.pdf

Fotografie filtrů.pdf

Komplexní aplikace v prostředí GUIDE.pdf

Komplexni_aplikace.fig

Komplexni_aplikace.m

sber.mdl

sber_RT.mdl